ノート

位相補償が可能な簡易ロックインアンプの試作

宮口　孝司*　天城　和哉*

A Prototype of Simple Lock-In Amplifier with Phase Compensation

MIYAGUCHI Takashi* and AMAKI Kazuya*

1. 緒　　言

マイクロキャピラリー電気泳動装置は，微細加工を応用したマイクロ化学チップの一種であり，これまで複雑で手間のかかっていた化学分析を安価かつ短時間に行うことができる。この装置を養液分析装置に適用することを目的に研究を進めてきた[1)]。

養液分析装置では，雑音に埋もれた微弱な信号を増幅して検出する必要があることからロックインアンプ[2)]を試作した。試作したロックインアンプは，広い周波数に渡って位相補償可能であるうえに，微弱な信号を扱う幅広い測定用途に適応が可能である。

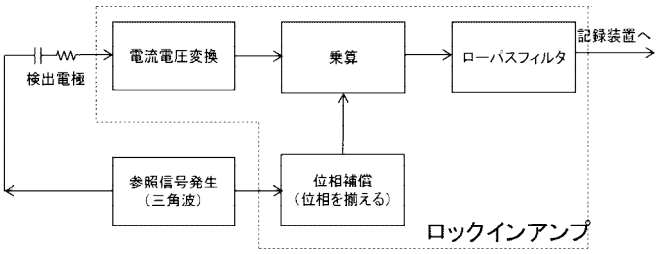

図１　試作したロックインアンプのブロック図

2. ロックアンプの構成

図１に試作したロックインアンプのブロック図を，図 2 に回路図を示す。以下の各項で，図 1 の各要素の働きを図 2 と併せて説明する。

2.1 参照信号発生

参照信号発生器で発生した三角波は，検出電極の励起と乗算器への参照信号として使用する。

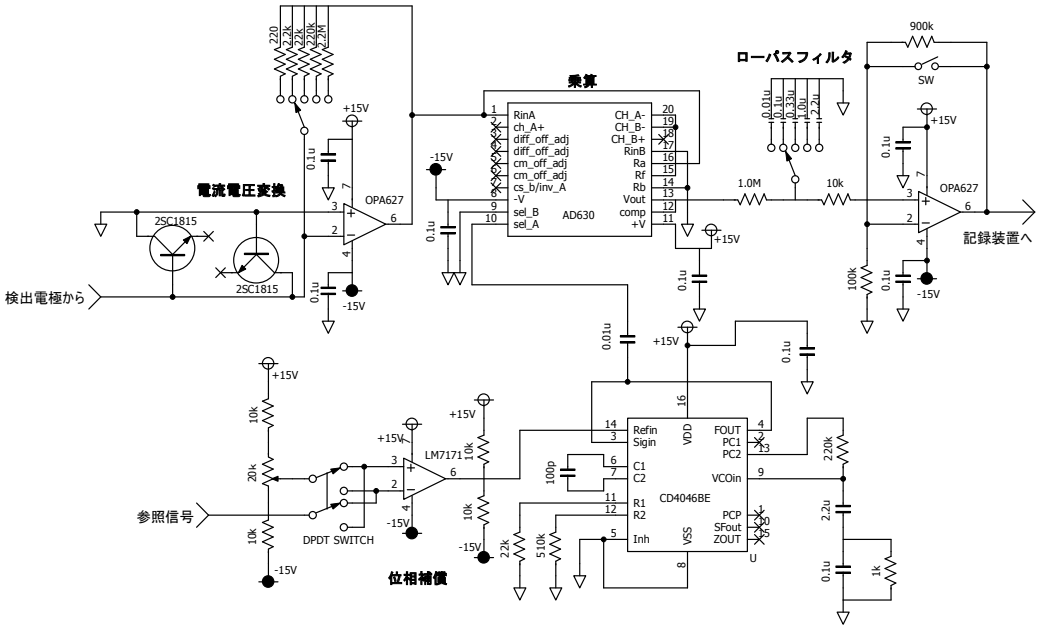

図２　試作したロックインアンプの回路図

＊　研究開発センター
　　レーザー・ナノテク研究室

実験では，ファンクションジェネレータ AD8624A（(株)エー・アンド・デイ）を使用した。励起電極によって励起され，検出電極からくる電流信号は，励起電極と検出電極間で形成されるコンデンサによって位相が 90° 進む。

2.2 電流電圧変換

図 2 の中で，電流電圧変換はオペアンプ OPA627（Burr Brown）で行われる。検出電極からきた信号はここで電圧に変換される。OPA627 は低ノイズオペアンプであり，数 μA の微弱な電流を数 V の電圧に変換する。増幅率は端子 2 と 6 の間で選択される抵抗値によって決まる。2 つのトランジスタ 2SC1815 は OPA627 に対する保護である。この要素では，電圧の位相が少し遅れる。

2.3 乗算

ロックインアンプの乗算には AD630（Analog Devices）を使用した。検出電極からの信号と参照信号を乗算する。この要素によって，参照信号と同期する成分のみが高感度で検出される。このとき検出電極からきた信号は，検出電極のコンデンサとオペアンプによって位相が進められているが，参照信号と検出電極からの信号との位相関係は不定であり，そのままでは位相同期しない。位相がずれた状態で乗算しても，高感度検出が実現しないため，位相補償回路で位相を揃える必要がある。位相補償回路については後述する。

2.4 ローパスフィルタ

その後，ローパスフィルタによって検出電極からの信号を直流成分に変換する。コンデンサを切り替えることによってカットオフ周波数を変えることができる。

次段のオペアンプ OPA627 はフィルタを通った信号の正帰還増幅回路である。端子 2，6 間のスイッチを閉じると増幅を行わない。

2.5 位相補償

ロックインアンプの感度を最大化させるために位相補償を付加した。この位相補償は，広い周波数に渡って位相を移すことが可能であるうえ，少ない部品点数で構成される。

位相補償は信号立ち上がり位相の調整回路と信号立ち上がりを用いた矩形波発生回路からなる。位相の調整回路は，参照信号発生器で発生させた三角波の参照信号と可変抵抗で設定した電圧をオペアンプで比較することによって立ち上がり位相を移す。矩形波発生回路で立ち上がりに同期したデューティー比 50%の矩形波を発生させることで位相が移される。

図 2 中の CD4046BE（Texas Instruments）は

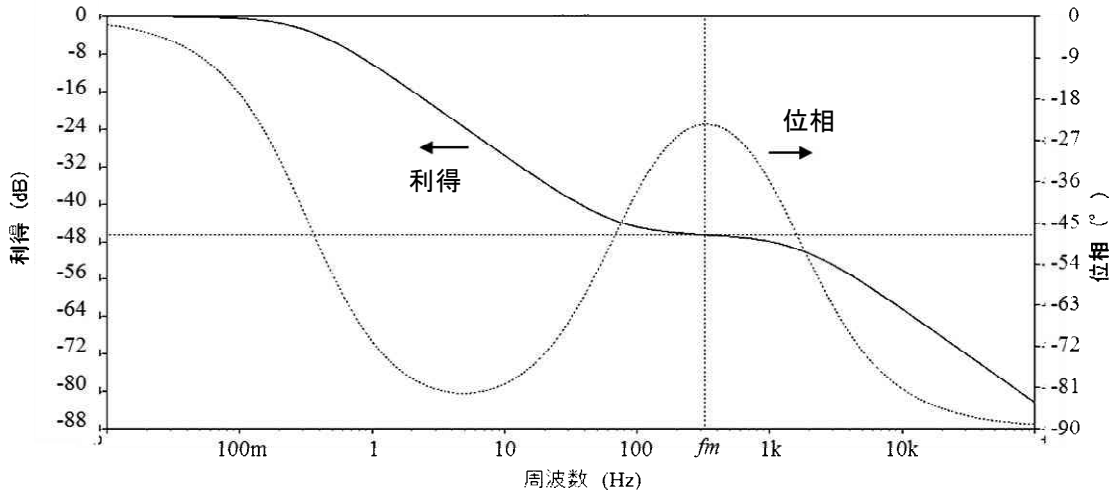

図 3　パッシブラグリードフィルタのボーデ線図

PLL（位相同期回路：Phase Locked Loop）IC であり，信号の立ち上がりに同期した矩形信号を発生させる。

CD4046BE の端子 13 と端子 9 間にはループフィルタが接続される。ループフィルタは PLL の発振を安定させるために重要である。ループフィルタは，位相差に比例する周期信号にローパスフィルタをかけ，電圧に比例した周波数を発生させる端子 9 に安定した直流電圧を供給する役目を果たす。位相差に関連する端子 13 は参照信号に相当する周期で変動する。通常ローパスフィルタは位相遅れを生じるが，位相遅れを，引き込み周波数で少なくするパッシブラグリードフィルタを用いることで，位相余裕を生み出し，引き込み特性を改善させることができる [3]。

図 3 は今回設計したパッシブラグリードフィルタのボーデ線図である。*fm* は位相遅れが極小になる周波数である。回路シミュレータ LT Spice のシミュレーションに基づいて素子を選択した。

3. 結　　果

図 4 にローパスフィルタをかける前のロックインアンプの出力波形を示す。測定は 350kHz の三角波を 2pF のコンデンサに通して入力側の OPA627 の端子 2 に入力した信号を AD630 の端子 13 を通してオシロスコープで観察した画像である。参照信号はコンデンサに印加した 350kHz の三角波を用いた。このとき，図 2 の 20kΩ の可変抵抗と DPDT Switch を用いて位相の調整を行った。

参照信号と入力信号の位相が揃っていない場合，乗算された波形のうち連続する 2 つの山の

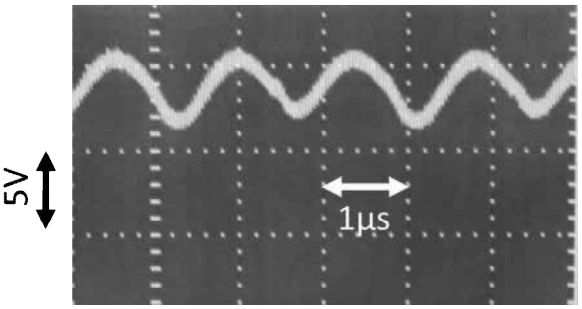

図 4　ローパスフィルタをかける前のロックインアンプの出力波形

高さは揃わないが，図 4 の波形は連続する 2 つの山の高さが揃い，あたかも 1 つの波形の様に見えることから位相補償が正常に行こなわれていることが確認できる。

4. 結　　言

(1) 施設園芸栽培における養液管理に適用が可能な養液成分分析装置を試作するため，ロックインアンプを試作した。

(2) 試作したロックインアンプに広い範囲に渡って位相補償可能な回路を付加した。

(3) 試作したロックアンプは 350kHz で位相補償が可能であることを確認した。

参考文献

1）宮口，佐藤，齋藤，天城，“イオン濃度分析装置”，特開 2016-148624.

2） S. K. Sengupta, et.al, “A Simple Law-Cost Lock-In Amplifier for the Laboratory”, Journal of Chemical Education, Vol. 82, No. 9, 2005, pp. 1399-1401.

3）遠坂俊昭，PLL 回路の設計と応用，CQ 出版（株），2003.